

К- и L-края поглощения рентгеновских лучей / закон Мозли и постоянная Ридберга



Физика

Современная физика

Природа рентгеновского излучения и его применение



Уровень сложности

твёрдый



Размер группы

2



Время подготовки

45+ Минут



Время выполнения

45+ Минут

PHYWE
excellence in science

Общая информация

Приложение

PHYWE
excellence in science

Экспериментальная установка

Большинство применений рентгеновских лучей основано на их способности проходить сквозь вещество. Поскольку эта способность зависит от плотности вещества, становится возможным получение изображений внутренних частей объектов и даже людей. Это находит широкое применение в таких областях, как медицина или безопасность.

Дополнительная информация (1/2)

PHYWE
excellence in science

Предварительные

знания



Предварительные знания, необходимые для этого эксперимента, приведены в разделе "Теория".

Принцип



Образцы различной толщины облучаются полихроматическим рентгеновским излучением медной рентгеновской трубки. Излучение, проходящее через образцы, анализируется с помощью монокристалла. Постоянная Ридберга рассчитывается на основе углов скольжения краев поглощения. Этот эксперимент включен в набор обновлений "XRS 4.0 Рентгеноструктурный анализ".

Дополнительная информация (2/2)

PHYWE
excellence in science

Обучение

цель



Задачи

Цель данного эксперимента - исследовать профиль рентгеновского излучения меди с помощью К- и L-края поглощения.

1. Проанализируйте рентгеновское излучение меди с помощью монокристалла LiF и в зависимости от угла Брэгга без и с несколькими образцами с К-краем поглощения в качестве поглотителей. Определите К-края поглощения различных поглотителей на основе спектров.
2. Вычислите постоянную Ридберга и константу экранирования на основе значений энергии К-края поглощения.
3. Действуйте, как описано в задании 1, но на этот раз с различными образцами для L-края поглощения.
4. Вычислите постоянную Ридберга на основе значений энергии L-края поглощения.

Инструкции по технике безопасности

PHYWE
excellence in science

При работе с химическими веществами следует надевать соответствующие защитные перчатки, защитные очки и подходящую одежду. Подробные инструкции по технике безопасности приведены в приложении.

Теория (1/4)

PHYWE
excellence in science

Когда рентгеновские лучи взаимодействуют с веществом, они теряют энергию из-за комптоновского рассеяния, образования пар и фотоэлектрического эффекта. Соответствующая сила этих трех эффектов зависит от энергии излучения. В диапазоне энергии, доступной во время этого эксперимента, фотоэлектрический эффект играет наиболее важную роль. На рис. 1 схематично показана зависимость пропускания T от энергии излучения E . Причиной неоднородности, известной как "краевое поглощение", является фотоэлектрический эффект.

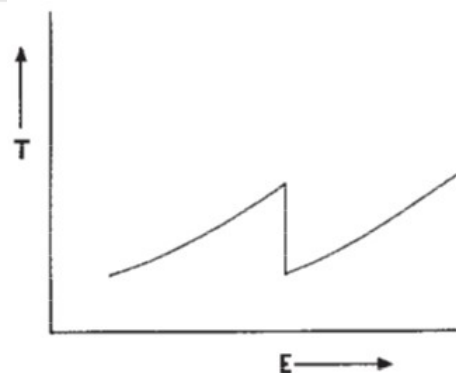


Рис. 1: Схематическое изображение зависимости пропускания T от энергии E в области края поглощения

Теория (2/4)

Для энергии связи E_n электрона на оболочке с главным квантовым числом n справедливо следующее:

$$E_n = -\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} (Z - \sigma)^2 \text{ где } (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

С введением постоянной Ридберга R :

$$R = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} = 3.2898 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1} \quad (2)$$

уравнение (1) преобразуется в:

$$E_n = R \cdot h (Z - \sigma)^2 \frac{1}{n^2} \quad (3)$$

Масса электрона : $m_e = 9.1091 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$

Заряд электрона: $e = 1.6021 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$

Постоянная Планка: $h = 6.6256 \cdot 10^{-34} \text{ Джс}$

Диэлектрическая постоянная: $\epsilon_0 = 8.8544 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$

Атомный номер: Z

Постоянная экранирования: σ

Для электронов на К-оболочке ($n = 1$) постоянная экранирования равна $\sigma \approx 1$.

Теория (3/4)

Расчет энергии по углам скольжения:

Используя уравнение Брэгга

$$2d \sin(\theta) = n\lambda, \quad (4) \quad (d: \text{межплоскостное расстояние; } n = 1, 2, 3, \dots)$$

(LiF(200) - межплоскостное расстояние $d = 201,4 \text{ пм}$)

при $n = 1$ и вместе с уравнением энергии

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (5)$$

окончательно получаем энергию ($n = 1$) исходя из углов скольжения краев поглощения:

$$E = \frac{h \cdot c}{2d \sin(\theta)} \quad (6)$$

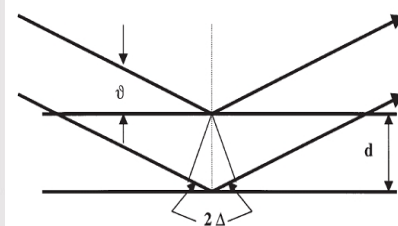


Рис. 2: Брэгговское рассеяние на паре плоскостей решетки

Теория (4/4)

В таблице 1 представлены θ значения краев поглощения различных поглотителей, которые были взяты из рис. 8. Уравнение (6) было использовано для расчета значений энергии E_K соответствующих K –оболочек. Для сравнения также приведены соответствующие табличные значения.

Уравнение (3) преобразуется для вычисления постоянной Ридберга R .

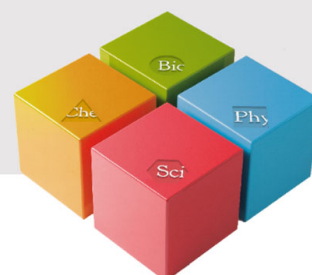
$$Z = \frac{1}{\sqrt{R \cdot h}} \cdot \sqrt{E + \sigma} \text{ (при } n = 1 \text{)} \quad (7)$$

	Z	$\theta [^\circ]$	E_K (эксп.) [кэВ]	E_K (таб.) [кэВ]
Zn	30	18.6	9.65	9.66
Ge	32	16.1	11.10	11.10
Se	34	14.0	12.72	12.66
Br	35	13.2	13.48	13.47
Rb	37	11.6	15.31	15.20
Sr	38	11.0	16.13	16.10
Ag	47	6.8	25.99	25.51

Таблица 1: Энергии К-края

Оборудование

Позиция	Материал	Пункт No.	Количество
1	XR 4.0 X-ray Базовая рентгеновская установка, 35 кВ	09057-99	1
2	XR 4.0 X-ray Гониометр для рентгеновской установки, 35 кВ	09057-10	1
3	XR4 Съёмная рентгеновская трубка Plug-in Cu tube	09057-51	1
4	XR 4.0 Рентгеноструктурный анализ, расширение	09145-88	1
5	XR 4.0 X-ray Химический набор для изучения границы поглощения	09056-07	1
6	Нитрат серебра, крист., 25 г	30222-04	1

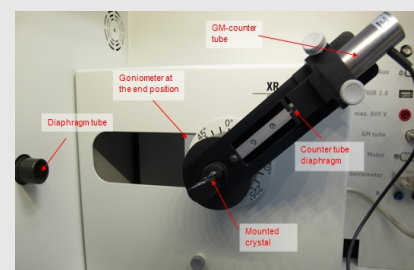
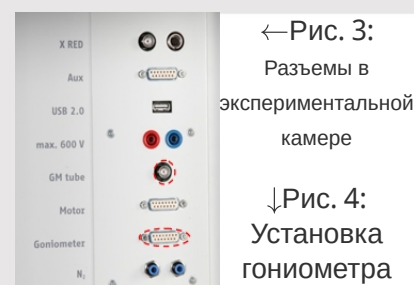


Подготовка и выполнение работы

Подготовка

Подключите гониометр и счетчик Гейгера-Мюллера к соответствующим гнездам в экспериментальной камере (см. красная маркировка на рис. 3). Блок гониометра с кристаллом анализатора должен располагаться в крайнем положении с правой стороны. Закрепите трубку счетчика Гейгера-Мюллера с держателем на заднем упоре направляющих. Не забудьте установить перед счетчиком диафрагму (см. рис. 4). Вставьте диафрагменную трубку диаметром 2 мм (без поглотителя) или 5 мм (с поглотителем) в выходное отверстие блока подключения трубки для коллимации рентгеновского пучка.

Для калибровки: Убедитесь, что в параметры гониометра введен правильный кристалл. Затем выберите "Меню", "Гониометр", "Автокалибровка". Теперь прибор определит оптимальные положения кристалла и гониометра относительно друг друга, а затем и положения пиков.



Выполнение работы (1/4)

PHYWE
excellence in science

- Подключите рентгеновскую установку через USB-кабель к USB-порту компьютера (нужный порт рентгеновской установки отмечен на рисунке 5).
- Запустите программное обеспечение `measure`. На экране появится виртуальная рентгеновская установка.
- Вы можете управлять рентгеновской установкой, нажимая на различные функции на виртуальной рентгеновской установке и под ней. Кроме того, Вы можете изменить параметры на самой рентгеновской установке. Программа автоматически примет настройки.



Рис. 5: Подключение компьютера

Выполнение работы (2/4)

PHYWE
excellence in science

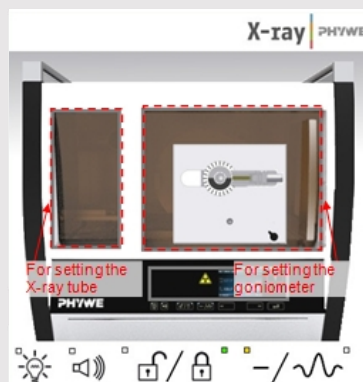


Рис. 6: Часть интерфейса программного обеспечения

- Нажмите на экспериментальную камеру (см. красную маркировку на рисунке 6), чтобы изменить параметры эксперимента. Выберите настройки, как показано в обзоре различных экспериментов. Угол обзора $\theta = 5^\circ$ - 26° . Для записи без поглотителя используйте трубку диафрагмы диаметром 2 мм. Если используется поглотитель, используйте трубку диафрагмы диаметром 5 мм.
- Если Вы нажмете на рентгеновскую трубку (см. красную маркировку на рис. 6), можно изменить напряжение и ток рентгеновской трубки. Выберите параметры, как показано на рис. 7.

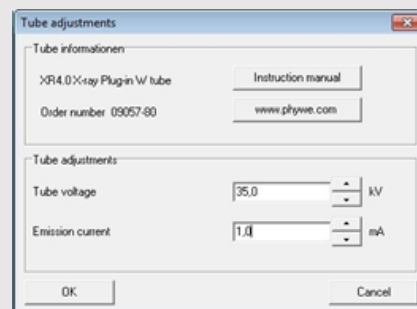
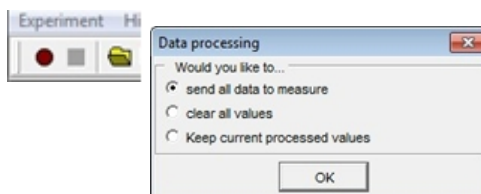


Рис. 7: Настройки напряжения и силы тока

Выполнение работы (3/4)

- Начните измерение, нажав на красный круг:
- После измерения появится следующее окно:



- Выберите первый пункт и подтвердите выбор нажатием кнопки ОК. Теперь измеренные значения будут переданы непосредственно в программу measure.
- В конце данного руководства вы найдете краткое введение в оценку полученных спектров.

Выполнение работы (4/4)

Обзор настроек гониометра и рентгеновской установки:

- Режим сопряжения 1:2
- диапазон сканирования: 4° - 21°
- ширина углового шага $0,1^{\circ}$
- Анодное напряжение $U_A = 35$ кВ; анодный ток $I_A = 1$ мА

Запись без поглотителя

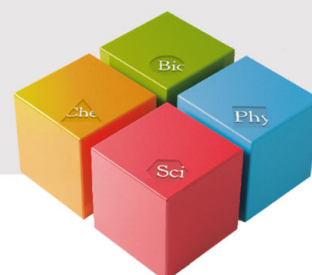
- Время выхода 2 с

Запись с поглотителем К-края

- Время выхода 3 с

Запись с поглотителем L-края

- Время выхода 6 с



Оценка

Задание 1

Проанализируйте рентгеновское излучение меди с помощью монокристалла LiF и в зависимости от угла Брэгга без и с несколькими образцами с К-краем поглощения в качестве поглотителей. Определите К-края поглощения различных поглотителей на основе спектров.

На рисунке 8 показана зависимость интенсивности I рентгеновского излучения меди от угла Брэгга θ характеристической линии K_{β} . Верхняя кривая показывает спектр без какого-либо поглотителя. Все остальные кривые были записаны с дополнительным образцом поглотителя. Чем выше атомный номер поглотителя, тем больше смещается край поглощения в сторону меньших углов скольжения.

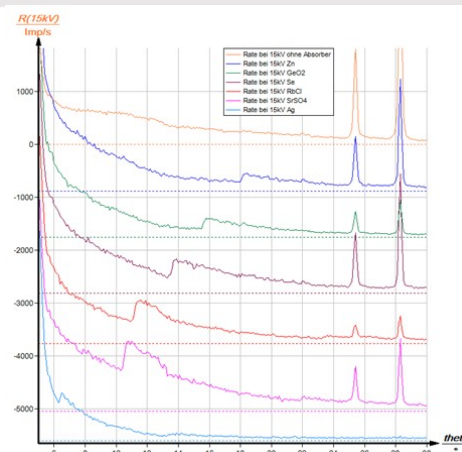


Рис. 8: Рентгеновские спектры меди без поглотителя (верхняя кривая) и с краями поглощения различных элементов

Задание 2

Вычислите постоянную Ридберга и константу экранирования на основе значений энергии К-краев поглощения.

С помощью уравнения (6) можно получить значения энергии края поглощения. На рисунке 9 показана функция $Z = f(\sqrt{E_K})$ на основе значений энергии E_K (эксп.) из таблицы 1.

На основании уравнения прямой линии $a = \frac{1}{\sqrt{R \cdot h}}$ для постоянной Ридберга получаем следующее:

$$R = \frac{1}{h} \cdot \frac{|\Delta(\sqrt{E})|^2}{(\Delta Z)^2} \quad (8)$$

С помощью значения для R и E_K (эксп.) значения из таблицы 1, уравнение (3) приводит к $\sigma(K) = (3.5 \pm 0.1)$ как среднее значение константы экранирования.

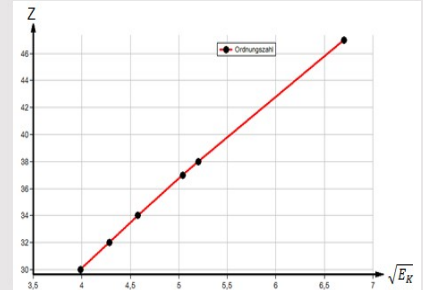


Рис. 9: Линия Мозли К-края поглощения для определения постоянной Ридберга.

Задание 3

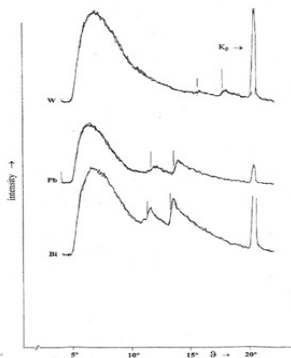


Рис. 10: Рентгеновский спектр меди с L-краем поглощения различных элементов

Действуйте, как описано в задании 1, но на этот раз с различными образцами для L-края поглощения.

На рис. 10 показан тормозной спектр с краями поглощения элементов с более высоким атомным номером. Тем не менее, хотя теоретически можно ожидать три края поглощения трех L-оболочек, можно увидеть только два. Разделение краев поглощения L_2 и L_3 подоболочки невозможно.

Задание 4

Вычислите постоянную Ридберга на основе значений энергии L-края поглощения.

Таблица 2 показывает результаты относительно L-края поглощения. Табличные значения $E_{L_{1,2}}$ приведенное для сравнения, было рассчитано путем взятия среднего из соответствующих значений L_1 и L_2 .

Оценка с помощью уравнения (1) в данном случае не имеет смысла, поскольку - помимо кулоновского взаимодействия - необходимо учитывать и другие процессы взаимодействия. Тем не менее, уравнение (1) помогает получить приблизительное представление об экранировании электронов на L-оболочках. Согласно (3) и при $n = 2$ плюс экспериментальные значения энергии, приведенные в таблице 2, дают следующие результаты:

$$\sigma(K) \ll \sigma(L_{1,2}) < 15 < \sigma(L_3) < 20$$

Рост постоянной экранирования подчеркивает уменьшение влияния потенциала ядра на электроны на внешних оболочках.

Задание 4 (часть 2)

	W (Z = 74)	Hg (Z = 80)	Pb (Z = 82)	Bi (Z = 83)
$\theta(L_{1,2})$	15.5	12.4	11.6	11.2
$E_{L_{1,2}}$ (эксп.)	11.52	14.33	15.31	15.85
$E_{L_{1,2}}$ (табл.)	11.82	14.52	15.53	16.05
$\theta(L_3)$	17.6	14.5	13.6	13.2
E_{L_3} (эксп.)	10.20	12.29	13.09	13.48
E_{L_3} (лит)	10.21	12.28	13.04	13.42

Таблица 2: Энергии L-края

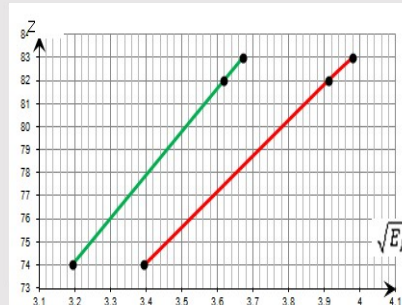


Рис. 11: Линии Мозли для L-края поглощения

Примечание

Программное обеспечение measure

Сначала преобразуйте углы скольжения (угол кристалла = оси x) спектров в соответствующие значения энергии. Для этого выполните следующие действия: "Анализ", "Рентгеновская спектроскопия", "Преобразовать ось x " и "Энергия ($n = 1$)". Линии Мозли могут быть получены из преобразованных спектров ($\text{Imp/s} = f(E/\text{keV})$) следующим образом:

K" id="MathJax-Element-3-Frame" role="presentation" style="position: relative;" tabindex="0">K

- Нажмите "Анализ", "Рентгеновская спектроскопия" и "Прямая линия Мозли". Появится окно "Прямая линия Мозли". Оно предлагает K - и L - края поглощения. Затем с помощью маркера выберите середину края поглощения в виде узкой полосы и нажмите "Принять значение". При необходимости область края поглощения можно увеличить с помощью функции масштабирования. Если в стартовом окне были введены данные о поглотителе и его атомный номер, то отображаются соответствующие парные значения энергии края и атомного номера. Последние также могут быть введены позже в дополнительное окно "Прямая линия Мозли". Чтобы сгенерировать прямую линию, нажмите "Создать линию Мозли". Постоянную Ридберга можно определить, нажав "Анализ", "Рентгеновская спектроскопия" и "Определить постоянную Ридберга". С помощью окон "Параметры отображения", "Каналы" и "Символ" при желании можно отобразить точки измерения линии Мозли.



Приложение

Информация о безопасности (1/7)

Символ опасности, сигнальное слово	Краткая характеристика опасности	Меры предосторожности
Хлорид рубидия (RbCl)		
-	--	--
Оксид германия (IV) (GeO ₂)		
	H302: Вреден при проглатывании H332: Вреден при вдыхании	--

Информация о безопасности (2/7)

Символ опасности, сигнальное слово	Краткая характеристика опасности	Меры предосторожности
Хлорид серебра (I) (AgCl)		
	H400: Очень токсичен для водной флоры и фауны	P273: Избегать попадания в окружающую среду.
Цинк		
-	--	--

Информация о безопасности (3/7)

Символ опасности,
сигнальное слово

Краткая характеристика опасности

Меры
предосторожности

Селен



H301: Токсичен при проглатывании

H331 Токсичен при вдыхании

H373: Вызывает повреждение органов в результате
длительного или повторяющегося воздействия

--.

H413: Может вызывать длительные вредные последствия
для водных организмов

Информация о безопасности (4/7)

Символ
опасности,
сигнальное
словоКраткая
характеристика
опасности

Меры предосторожности

Бромид калия
(KBr)H315: Вызывает
раздражение кожиH319: Вызывает
серьезное
раздражение глазH335: Может вызвать
раздражение
дыхательных путейP261: Избегать дыхания пылью/паром/газом/туманом/парами/
аэрозолем.P305 + P351 + P338: При попадании в глаза: осторожно промойте
водой в течение нескольких минут. Снимите контактные линзы, если
они есть. Продолжайте промывание.Сульфат
стронция (SrS)

Информация о безопасности (5/7)

PHYWE
excellence in scienceСимвол
опасности,
сигнальное
слово

Краткая характеристика опасности

Меры предосторожности

Оксид свинца
(IV) (PbO₂)

H272: Может усиливать огонь; окислитель

P201: Получите специальные инструкции перед использованием.



H302: Вредно при проглатывании

P220: Хранить вдали от одежды/.../горючих материалов.

H332: Вредно при вдыхании

50: Может нанести вред фертильности или нерожденному ребенку

P273: Избегайте попадания в окружающую среду.

H373: Вызывает повреждение органов в результате длительного или многократного воздействия.

P308 + P313: Если вы подвержены воздействию или обеспокоены: Получите медицинскую консультацию/помощь.

Информация о безопасности (6/7)

PHYWE
excellence in scienceСимвол опасности, сигнальное
слово

Краткая характеристика опасности

Меры
предосторожностиОксид вольфрама(IV) (WO₂)

H335: Может вызвать раздражение дыхательных путей

--

Информация о безопасности (7/7)

Символ опасности, сигнальное слово	Краткая характеристика опасности	Меры предосторожности
	оксид висмута(III) (Bi_2O_3)	
	H315: Вызывает раздражение кожи	P261: Избегать дыхания пылью/паром/газом/туманом/парами/аэрозолем.
	H319: Вызывает серьезное раздражение глаз H335: Может вызвать раздражение дыхательных путей	P305 + P351 + P338: При попадании в глаза: осторожно промойте водой в течение нескольких минут. Снимите контактные линзы, если они есть. Продолжайте промывание.